



بررسی نظریه‌های مختلف در تعیین مقاومت برشی تیوروقها

فرزاد شهابیان، استادیار، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد*

سلیمان قوهستانی، کارشناس ارشد سازه**

* تلفن: ۰۵۱۱-۸۶۱۵۱۰۰، شماره: ۰۵۱۱-۸۶۲۹۵۴۱، پست الکترونیکی: fshahabianm @ yahoo.com

** تلفن: ۰۷۸۱-۳۳۳۳۰۴۲، پست الکترونیکی: soleiman_539 @ yahoo.com

چکیده

مقاومت برشی تیوروقها با توجه به نظریه‌های باسلر و پورتر که به ترتیب مبنای آیین‌نامه‌های AISC و BS5950 قرار گرفته است، تعیین می‌گردد. بر طبق نظریه‌های فوق، مقاومت برشی نهایی تیوروقها شامل دو بخش کمانشی و پس کمانشی می‌باشد. اگر چه مقاومت برشی ارائه شده توسط نظریه‌های فوق با نتایج تجربی سازگاری خوبی دارند، اما بررسیهای انجام شده در پژوهش حاضر شامل محاسبه مقاومت کمانشی و مقاومت نهایی برشی تیوروقها به کمک نرم‌افزار ANSYS و مقایسه با نتایج آزمایشهای موجود، نشان می‌دهد که این نظریه‌ها اغلب مقاومت کمانشی را کمتر و مقاومت پس کمانشی را بیشتر در نظر می‌گیرند که این به ترتیب ناشی از کم در نظر گرفتن صلیب اتصال بال به جان از یکسو و عدم محاسبه اثرات تنشهای ناشی از خمش خارج از صفحه از دیگر سو می‌باشد.

کلید واژه ها: مقاومت برشی، تیوروق، آنالیز اجزای محدود، نظریه باسلر و پورتر

۱- پیشگفتار

کار اصلی صفحه جان در یک تیوروق ایجاد فاصله نسبی بین بالهای بالا و پایین و مقاومت در برابر نیروهای برشی وارده می‌باشد. برای بالا بردن مقاومت خمشی تیوروقها، تمایل به انتخاب ارتفاع بیشتر جان می‌باشد. از طرفی برای کاهش وزن تیوروقها معمولاً ضخامت جان را بسیار کم انتخاب می‌کنند. از اینرو صفحه جان تحت تأثیر نیروی برشی دچار کمانش خواهد شد. تیوروقها اغلب برای افزایش مقاومت کمانشی، با سخت‌کننده‌های عرضی مسلح می‌شوند. با توجه به نوع هندسه، هنگامی که صفحه جان شروع به کمانش می‌کند، به دلیل وجود مقاومت پس کمانشی، قادر به تحمل نیروهای اضافی قابل ملاحظه‌ای است. با در نظر گرفتن این واقعیت می‌توان تیوروقهای با نسبت مقاومت به وزن مناسب طراحی کرد. به رغم این حقیقت که رفتار پس کمانشی در سال ۱۸۸۶ توسط ویلسون کشف شد و نظریه کشش قطری در سال ۱۹۳۱ توسط واگنر توسعه یافت، اما کمانش الاستیک به عنوان

یک مبنای مهم برای طراحی جان تیورورها تا سال ۱۹۶۰ مورد استفاده قرار گرفته است. علت این امر به سبب این واقعیت است که فرمولهای پیش‌بینی مقاومت کمانشی صفحه جان، ساده و از مدتها قبل شناخته شده بوده است. در اواخر دهه ۱۹۵۰ تحقیقات گسترده‌ای روی رفتار پس کمانشی تیورورها توسط باسلر [۱] انجام شد. بر این اساس آیین‌نامه AISC مقاومت پس کمانشی را به عنوان خصوصیتی مهم در سال ۱۹۶۳ پیشنهاد کرد [۲]. از آن پس با در نظر گرفتن مفاهیم طرح حالت حدی در سازه‌های فولادی، کار باسلر توسط سایر محققین از جمله پورتر ادامه داده شد [۳].

در محاسبه مقاومت کمانشی صفحه جان لازم است که شرایط مرزی به طور مناسبی تعیین شود. بعد از شروع کمانش جان، تنشهای بزرگی به دلیل تغییر شکلهای خارج از صفحه، در صفحه جان ایجاد می‌شود. این تنشها در محاسبه مقاومت برشی تیورورها در نظریه باسلر و پورتر در نظر گرفته نمی‌شوند. در این پژوهش، مقاومت برشی تیورورها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آنالیز با نتایج آزمایش و نتایج نظریه های باسلر و پورتر مقایسه شده است. در این مطالعه از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS استفاده شده که قادر به در نظر گرفتن خاصیت غیرخطی هندسی و خاصیت الاستو-پلاستیک مواد می‌باشد.

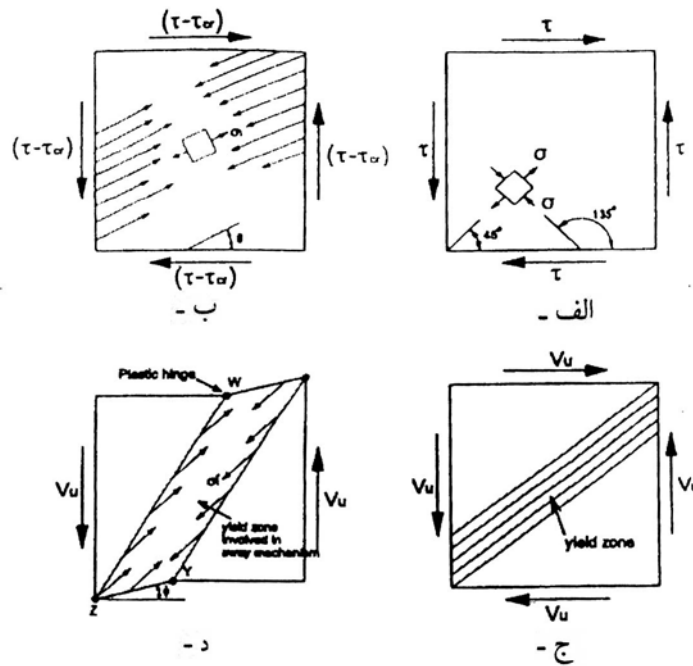
۲- مروری کوتاه بر نظریه های باسلر و پورتر

هنگامی که صفحه جان تحت تأثیر برش قرار می‌گیرد تنشهای کششی و فشاری اصلی مساوی از ابتدای بارگذاری تا زمان شروع کمانش همانند شکل (۱-الف) افزایش می‌یابد. هنگامی که نیروی برشی تا مقاومت کمانشی و بیش از آن افزایش یافت؛ صفحه جان قادر به تحمل تنشهای فشاری بیشتر نخواهد بود. بعد از کمانش، باربرشی اضافی توسط تنشهای کششی قطری σ_f که در شکل (۱-ب) نشان داده شده است، حمل می‌شود. باسلر [۱] فرض کرده است که بالها در تیورور دارای صلیب خمشی کافی برای مقاومت در برابر کشش قطری نیستند و دامنه میدان کشش در نزدیکی اتصال بال به جان گسترش نمی‌یابد و جان همانند شکل (۱-ج) بعد از گسترش منطقه تسلیم دچار گسیختگی خواهد شد. بر اساس این نظریه تیورور در محل اتصال بال به جان دارای شرایط مرزی تکیه گاه ساده می‌باشد و مقاومت برشی نهایی از جمع مقاومت کمانشی و پس کمانشی با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$V_u = \tau_{yw} d_w t_w \left[\frac{\tau_{cr}}{\tau_{yw}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1 - \tau_{cr} / \tau_{yw}}{\sqrt{(1 + (b_w / d_w)^2)}} \right] \quad (1)$$

در نظریه پورتر [۳] بالها همانند شکل (۱-د) قادر به تحمل میدان کشش قطری هستند. مفاصلهای پلاستیک بعد از ایجاد ناحیه تسلیم تشکیل شده و صفحه جان تحت تأثیر این مکانیزم گسیخته خواهد شد. بر اساس نظریه پورتر مقاومت برشی نهایی مجموع مقاومت برشی کمانشی جان، برش تحمل شده به وسیله میدان کشش و مقاومت بالها تا تشکیل مفاصلهای پلاستیک می‌باشد.

$$V_u = \tau_{cr} d_w t_w + \sigma_t t_w \sin^2 \theta (d_w \cot \theta - b_w) + 4 d_w t_w \sin \theta \sqrt{(\sigma_{yw} M_p^* \sigma_t)} \quad (2)$$

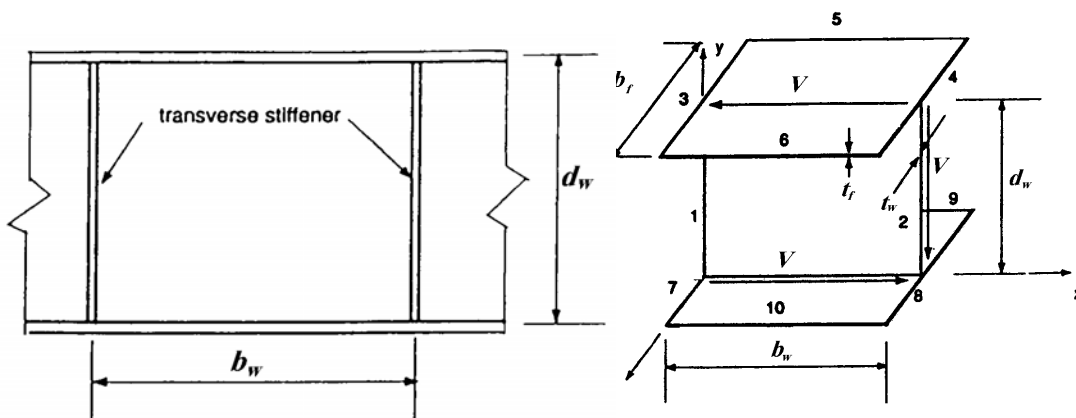


شکل ۱: مکانیزم گسیختگی صفحه جان تحت تأثیر نیروی برشی (الف) رفتار قبل از کمانش (ب) رفتار بعد از کمانش (ج) رفتار گسیختگی بر اساس نظریه باسلر (د) رفتار گسیختگی بر اساس نظریه پورتیر

۳- آنالیز اجزای محدود توسط نرم افزار ANSYS

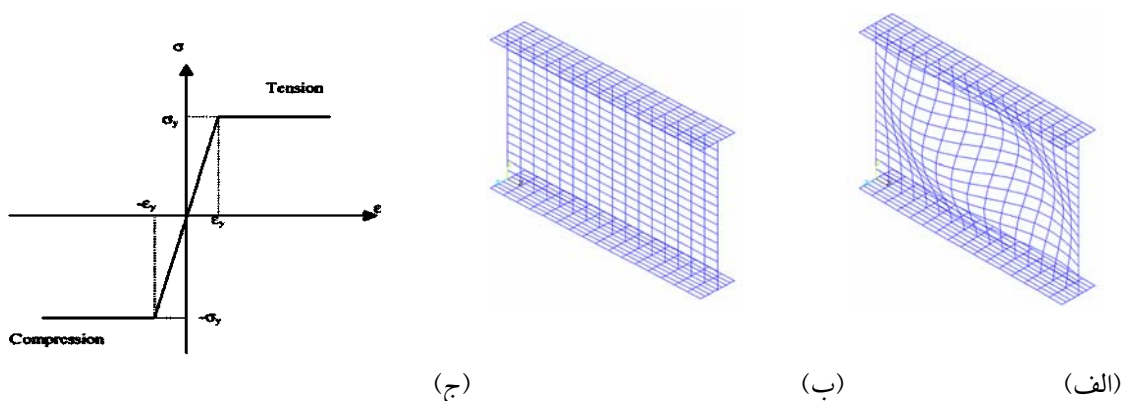
۳-۱- مدل اجزای محدود

شکل (۲) یک تیرورق با سخت کننده‌های عرضی و مدل اجزای محدود آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲: تیرورق با سخت کننده‌های عرضی و مدل اجزای محدود تیرورق

جان و بالها به صورت المانهای پوسته چهار گره‌ای الاستیک SHELL63 برای آنالیز کمانشی و المانهای پوسته چهار گره‌ای SHELL43 برای آنالیز الاستو-پلاستیک توسط نرم افزار ANSYS مدل شده‌اند. در تحلیل مقاومت نهایی تغییر شکلی متناظر با ضریب بسیار کوچکی از مود کمانشی در مدل اجزای محدود ایجاد می‌شود. این تغییر شکل به نحوی به نمونه اعمال می‌شود که میزان تغییر مکان خارج از صفحه از مقدار مجاز ($d / 120$) ارائه شده توسط آیین نامه AASHTO کمتر باشد (d حداقل دو مقدار فاصله سخت کننده‌های عرضی یا ارتفاع تیرورق می‌باشد). شکل (۳- الف) مود اول کمانشی تیرورقهای تحلیل شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳: (الف) مود کمانشی تیرورق (ب) مش بندی اجزای محدود (ج) منحنی تنش- کرنش فولاد

برای انجام تحلیل مقاومت نهایی دو بار آنالیز تیرورق مورد نیاز می‌باشد. در اجرای اول، آنالیز کمانشی روی سازه بدون نقص برای تعیین مود کمانشی به کار می‌رود. در اجرای دوم یک نقص در هندسه تیرورق با منظور کردن ضریبی از تغییر شکل مود اول کمانشی با استفاده از گزینه Uptodate Geom در نرم افزار اعمال و سپس آنالیز غیرخطی انجام می‌شود.

۳-۲- پارامترهای آنالیز

در آنالیز تیرورق توسط نرم افزار فرض شده است که فولاد در حالت کشش و فشار به صورت ماده الاستو-پلاستیک کامل همانند شکل (۳- ج) رفتار می‌کند. ابعاد و خصوصیات مدل بر اساس نمونه‌های آزمایش معرفی و معیار تسلیم ماده توسط تابع تسلیم فون میزس بیان گردیده است. روش تکرار نیوتن-رافسون برای آنالیز پاسخ غیرخطی تیرورق توسط نرم افزار بکار برده شده است.

۳-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط مرزی لبه‌های تیرورق که در شکل (۲) نشان داده شده است، در جدول (۱) معرفی می‌شود. u ، v و w درجات آزادی انتقالی و θ_x و θ_y و θ_z درجات آزادی دورانی حول محورهای x ، y و z می‌باشند. عدد صفر و یک به ترتیب بیانگر آزاد بودن و مقید بودن درجه آزادی است. به عنوان مثال لبه-های ۱، ۲، ۳، ۴ و ... به علت وجود سخت کننده نمی‌توانند در جهت Z (w) تغییر مکان داشته باشند.

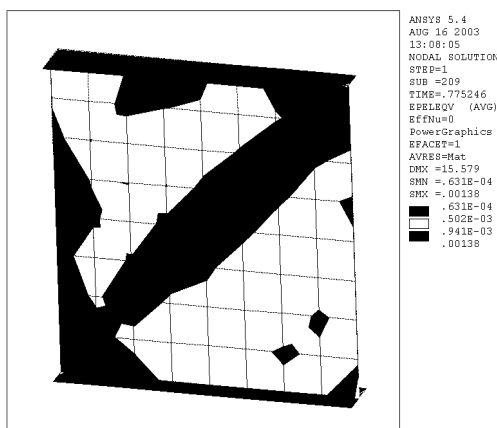
جدول ۱: شرایط مرزی اعمال شده در مدل اجزای محدود

شماره لبه تیرورق	u	v	w	θ_x	θ_y	θ_z
1	1	1	1	1	0	1
2	0	0	1	1	0	1
3,7	0	1	1	1	1	0
4,8	0	0	1	1	1	0
5,6,9,10	0	0	0	0	0	0

برای شبیه‌سازی حالت برش خالص، نیروی برشی v ، همانند شکل (۲) اعمال شده است. همانند شکل (۳)-ب) از مش بندی (16×16) برای جان و مش بندی ($8 * 16$) برای بال تیرورق استفاده شده است. برای تخمین دقت مش بندی با انجام آنالیز کماتشی یک صفحه مربع شکل دارای تکیه گاه ساده، اختلاف بین حل دقیق (تیموشنکو و گیر [۴]) و تنش برشی بحرانی ناشی از آنالیز فقط 0.15% می‌باشد. بنابراین الگوی مش بندی برای آنالیز مناسب است.

۴- رفتار تیرورق

بعد از کماتش الاستیک، صفحه جان مقاومت پس کماتشی قابل ملاحظه‌ای از خود نشان می‌دهد. هنگامی که بارگذاری فراتر از نقطه بحرانی افزایش یابد تنش کشش قطری و تنشهای قائم ناشی از تغییر شکلهای خارج از صفحه، افزایش می‌یابد؛ با افزایش بیشتر بارگذاری، تسلیم مواد در خط اصلی کشش قطری شروع می‌شود. شکل (۴) نحوه تغییر تنش در صفحه جان تیرورق نمونه TG1 (جدول ۲) را به صورت سطوح هم تراز تنش نشان می‌دهد.



شکل ۴: سطوح هم تراز تنش در تیرورق TGI

۴-۱- مقاومت کمانش برشی

در مدل‌های باسلر و پورتر (کاردیف) اتصال صفحه جان به بال ساده فرض شده و مقاومت کمانشی برشی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V_{cr} = \tau_{cr} d_w t_w \quad (۳)$$

در این رابطه τ_{cr} تنش بحرانی صفحه جان مستطیلی توسط تیموشنکو و گیر [۴] و لی [۵] بوده که با رابطه زیر بیان می‌شود.

$$\tau_{cr} = K \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{d_w}{t_w}\right)^2} \quad (۴)$$

ضریب کمانشی K توسط رابطه زیر تقریب زده می‌شود.

۱- برای صفحاتی که در طول هر چهار لبه دارای تکیه گاه ساده هستند (SS).

$$K_{SS} = 5.34 + 4\left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 \quad \frac{d_w}{b_w} \leq 1 \quad K_{SS} = 4 + 5.34\left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 \quad \frac{d_w}{b_w} \geq 1 \quad (۵)$$

۲- برای صفحات جان با تکیه گاه گیردار در محل اتصال بین بال و جان و تکیه گاه ساده در طول دو ضلع دیگر (SF).

$$K_{sf} = 9.98 + 5.61\left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 - 1.99\left(\frac{d_w}{b_w}\right)^3 \quad \frac{d_w}{b_w} \leq 1 \quad (۶)$$

$$K_{sf} = 5.34\left(\frac{d_w}{b_w}\right)^2 + 2.31\left(\frac{d_w}{b_w}\right) - 3.44 + 8.39\left(\frac{b_w}{d_w}\right) \quad \frac{d_w}{b_w} \geq 1 \quad (۷)$$

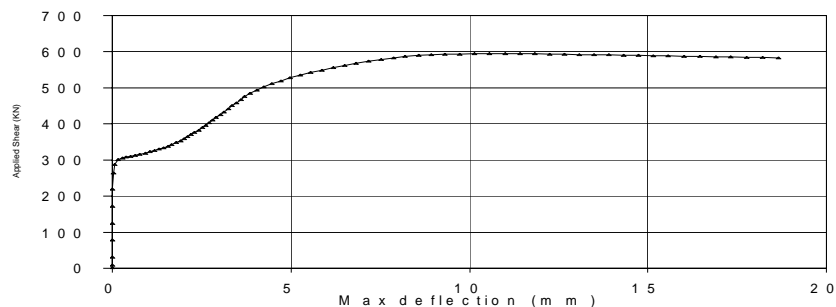
مقایسه مقاومت کمانشی ناشی از آنالیز اجزای محدود با مقاومت کمانشی تیرورق با شرایط مرزی تکیه گاه ساده و گیردار در جدول (۲) نشان می دهد که نتایج آنالیز به حالت تیرورق با تکیه گاه گیردار نزدیکتر است. بنابراین فرض تکیه گاه ساده منجر به کمتر در نظر گرفتن قابل ملاحظه مقاومت کمانشی برشی تیرورق می شود.

جدول ۲: مقایسه مقاومت کمانشی نمونه ها با شرایط مرزی مختلف

شماره تیرورق	b_w/d_w	مشخصات نمونه ها						مقاومت کمانش برشی		
		جان		بال		تنش تسلیم		V_{cr}^{SF} (KN)	V_{cr}^{SS} (KN)	V_{cr}^{FEM} (KN)
		t_w (mm)	d_w (mm)	t_f (mm)	b_f (mm)	F_{yf} (Mpa)	F_{yw} (Mpa)			
G2	1.0	4.0	600	10	200	303.8	318.5	262	180	237
G3	1.0	4.0	600	15	200	303.8	318.5	262	180	240
G5	1.5	4.0	600	10	200	303.8	318.5	229	137	198
G6	1.5	4.0	600	20	200	303.8	318.5	229	137	205
G7	2.0	4.0	600	10	200	303.8	285.2	214	122	181
G8	2.0	4.0	600	15	200	303.8	285.2	214	122	187
TG1	1.0	2.5	100	5.06	160	280	200	-	-	-

۴-۲- مقاومت برشی نهایی

در این بخش مقاومت برشی نهایی ناشی از آزمایش [۵]، آنالیز اجزای محدود (پژوهش حاضر) و دو نظریه مورد نظر با یکدیگر مقایسه شده اند. البته برای این کار تعداد زیادی تیر ورق تحلیل شده که در متن حاضر بدان اشاره نشده است (شکل (۵) و جدول (۳)).



شکل ۵: منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی تیر ورق نمونه (G7T1) در آنالیز اجزای محدود ANSYS

همان طور که در جدول (۳) دیده می شود نظریه های باسلر و پورتر (کاردیف) مقاومت نهایی (مجموع مقاومت کمانشی و پس کمانشی) را نسبتاً خوب ارزیابی می کنند. اما باید به این واقعیت توجه کرد که هر دو نظریه سهم مقاومت کمانشی را به طور محافظه کارانه ای خیلی کم در نظر می گیرند و این اختلاف بین ۳۱ الی ۵۴ درصد می باشد. بنا براین به همان نسبت باید سهم مقاومت پس کمانشی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کنند که

البته این اختلاف به حدود ۴۵ تا ۶۰ درصد می رسد. علت این امر نیز صرفنظر کردن از اثرات تنشهای ناشی از خمش خارج از صفحه در مرحله پس کمانشی می باشد.

از نتایج حاصل چنین بر می آید که در هر صورت نظریه باسلر در برآورد مقاومت نهایی برشی نسبت به نظریه پورتر (کاردیف) با افزایش ضخامت بال و نسبت بعد (b_w/d_w) محافظه کارانه تر است.

جدول ۳: مقایسه نظریه های مختلف با نتایج آزمایش و آنالیز اجزای محدود

شماره تیرورق	b_w/d_w	V_u^{ex} (KN)	V_u^{FEM} (KN)	V_u^{basler} (KN)	$V_u^{cardiff}$ (KN)
G2	1.0	333	312	340	343
G3	1.0	337	318	340	379
G5	1.5	286	275	283	277
G6	1.5	313	286	283	336
G7	2.0	259	236	228	226
G8	2.0	276	248	228	252
G7T1	1.0	645	591	632	658

۵- نتیجه گیری

نظریه های باسلر و پورتر (کاردیف) قادر به محاسبه مقاومت برشی نهایی تیرورق می باشند؛ اما مکانیزمهای گسیختگی در این نظریه ها رفتار برشی صفحات جان را با توجه به نکات زیر به طور دقیق نشان نمی دهد.

۱- فرض شرایط مرزی در محل اتصال جان به بال تیر ورق ها به صورت تکیه گاه ساده مقاومت کمانشی صفحات جان را به طور محافظه کارانه ای کمتر از مقدار واقعی ارائه می کند. آنالیز انجام شده نشان می دهد که شرایط مرزی فوق به حالت گیردار نزدیکتر است.

۲- در هر دو نظریه از اثرات تنشهای ناشی از خمش خارج از صفحه جان در مرحله پس کمانشی صرفنظر شده است. نتایج آنالیز تنشهای فوق را در لحظه وقوع گسیختگی به مقدار قابل ملاحظه ای نشان می دهد که منجر به کاهش سهم مقاومت پس کمانشی می شود.

۳- در هر صورت با افزایش نسبت بعد (b_w/d_w) نتایج حاصل از هر دو نظریه محافظه کارانه می باشد. علاوه بر این از نتایج حاصل چنین بر می آید که در هر صورت نظریه باسلر در برآورد مقاومت نهایی برشی نسبت به نظریه پورتر (کاردیف) با افزایش ضخامت بال و نسبت بعد (b_w/d_w) محافظه کارانه تر است. بدین ترتیب به نظر می رسد که مناسب است نظریه های فوق اصلاح شده و یا این که نظریه جدیدی برای تعیین مقاومت برشی تیر ورقها ارائه شود.

۶- مراجع

- [1] Basler, K. "Strength of Plate Girders in Shear", Journal of Structural Division, ASCE, 87(7), pp 151-180, 1961.
- [۲] میرقادری، رسول، "آئین نامه سازه های فولادی AISC"، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان، زمستان ۱۳۶۸.
- [3] Porter, D.M. Rockey, K.C and Evans. H.R, "The collapse behavior of Plate girders Loaded in shear", Structural Engineering, Vol. 53, pp 313-325, 1975.

[4] Timoshenko, S.P. and Gere, J.M. "Theory of Elastic Stability", McGraw- Hill,1988.

[5] Lee, S.C., Davidson, J.S, and Yoo, C.H. "Shear buckling coefficients of Plate girder web Panels", Computers and Structures, 59(5) , pp 789-795, 1996.